

層分割された地震時斜面の平面すべり崩壊機構に おける安定について

澤田 知之*・松岡 健一**・能町 純雄***

On Stability of Plane Failure Mechanism in a Seismic Slope divided some layers

Tomoyuki SAWADA, Kenichi G. MATSUOKA and Sumio G. NOMACHI

要 旨

本報告は、地震時斜面の平面すべり崩壊機構についての安定解析について斜面が泥岩層など軟弱層を含む場合に拡張して行ったもので極限解析の上界法を用いて土の構成方程式を設定することなく簡便な解析手法でかつ工学的精度を損わずに行なえることを示したものである。

Abstract

In this paper, it is attempted to evaluate the plane failure mechanism of a Seismic Slope included peat layer. The method of upper bound technique of limit analysis without soil constitute equations is derived from the assumption that soil deformation obeys the flow rule associated with the Coulomb yield condition and engineering accuracy takes good place as engineering informations increase.

1. ま え が き

近年、地震による斜面のすべり崩壊が発生し、大きな震害となっているが、特に軟弱層を含む場合にこれが著しいものとなっている。従来、斜面の安定解析は、概して、すべりに対するモーメントあるいは力の釣合いによるものがほとんどであったが、本報告では、軟弱層部分が考慮できるよう層分割した斜面を解析対象とし、極限解析の上界法を用い、土塊のすべり運動による仕事率とすべり面の粘着抵抗による仕事率が等しいとして、安定指標の限界地震水平加速度係数を求めようとするものである。これは多変数の関数として表わされこれを制約条件付き非線形最適化問題として取り扱った。

2. 一般式の誘導

2-1：等方・等質土斜面の場合

図-1において土塊ABCの面積は

$$A = \frac{1}{2} L^2 \sin \alpha \cos \alpha + \frac{1}{2} \frac{H^2}{\tan \beta} + HL \cos \alpha - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{\tan \beta} + L \cos \alpha \right) (H + L \sin \alpha) = \frac{1}{2} HL \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right) \text{となる。}$$

これより、土塊ABCの土の自重による鉛直方向の仕事率は

$$\dot{W}_1 = \frac{1}{2} HL \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right) \gamma \cdot V \sin (\theta - \phi) \quad (1)$$

で表わされる。

ここに、 γ は土の単位体積重量、 V は土塊のすべる速度、 ϕ は土の内部摩擦角である。

また、載荷重 p による鉛直方向の仕事率は

$$\dot{W}_2 = pL \cdot V \sin (\theta - \phi) \quad (2)$$

となる。

* 土木工学科 助教授

** 室蘭工業大学 土木工学科 教授

*** 日本大学 生産工学部 土木工学科 教授

2-2: 層分割され不均質・異方性土斜面の場合

解析モデルは図-2に示すように斜面を水平に分割して各々の層ごとに粘着力 c 、土の単位体積重量 γ 、土の内部摩擦角 ϕ が与えられ、粘着力 c については、水平方向粘着力 c_h と鉛直方向粘着力 c_v の比 $\kappa (= c_h / c_v)$ もそれぞれの層ごとに与えられるようにした。

前述2-1の等方・等質斜面の場合は崩壊土塊ABCの自重は△ABCの面積に γ を乗じたもので表わされたが、図-2においては γ が層によって異なる為、土塊ABCの総自重 w_t は

$$w_t = \gamma_1 A_1 + \gamma_2 A_2 + \gamma_3 A_3 = \sum_{m=1}^3 (\gamma_m \cdot A_m) \quad (8)$$

と表わされ、土塊ABCの鉛直方向の仕事率は

$$\dot{W}'_1 = \sum_{m=1}^3 (\gamma_m \cdot A_m) \cdot V \sin(\theta - \phi_m) \quad (9)$$

同様に水平方向の仕事率は

$$K \cdot \dot{W}'_3 = \sum_{m=1}^3 K \cdot (\gamma_m \cdot A_m) \cdot V \cos(\theta - \phi_m) \quad (10)$$

となる。次に载荷重 p による仕事率は内部摩擦角 ϕ をC点の存在する層の ϕ と考え ϕ_c とすると同様に

$$\dot{W}'_2 = pLV \sin(\theta - \phi_c) \quad (11)$$

$$K \cdot \dot{W}'_4 = xK \cdot pLV \sin(\theta - \phi_c) \quad (12)$$

また、粘着抵抗はすべり面も3分割される為、各々の粘着力にすべり面の長さ s と $V \cos \phi_m$ を乗じた総和で示され次のように表わされる。

$$\dot{W}'_5 = \sum_{m=1}^3 (c_m \cdot s_m \cdot V \cos \phi_m) \quad (13)$$

ここで、 $\dot{W}'_1 \sim \dot{W}'_4$ の総和と $\dot{W}'_5$ の粘着抵抗による仕事率が等しいと置いて、水平地震加速度 K について解くと次のように示される。

$$K = F(\theta) = \frac{\dot{W}'_5 - \dot{W}'_2 - \dot{W}'_1}{\dot{W}'_3 + \dot{W}'_4} \quad (14)$$

最小の限界水平地震加速度係数 K_c は次式で表わされる。

$$K_c = \min. F(\theta) \quad (15)$$

3. 数値解析および考察

数値計算結果を図-3、4及び図-6～8に示す。これらは、斜面の形状、土の性質が及ぼす影響を表わしている。図-3は上部斜面角 α の影響を示す。縦軸は限界地震加速度係数 K_c である。

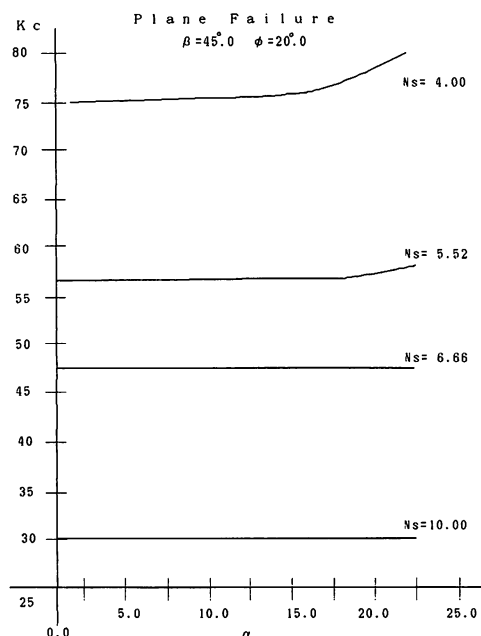


図-3 安定係数 (N_s) と上部斜面角 (α) の影響

例えば $K_c = 0.5$ と言うのは、水平方向に重力加速度 G の0.5倍の加速度がかかることを言う。横軸は、上部斜面角の α を取っている。図より α を変化させても、あまり K_c には変化が見られず、上部斜面角の影響は小さいものと考えられる。 $N_s = 4.00$ で $\alpha = 20^\circ$ の付近でグラフが上方に向かう傾向を示すのは、 $L/H \leq 10.0$ と制約した為である。ここで N_s とは

$N_s = \gamma H / c$ で表わされる安定係数で、本計算では、 $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$ 、 $H = 10 \text{ m}$ とし粘着力 c を変化させている。即ち、

$$N_s = 4.00 \quad (c = 4.0 \text{ kg/cm}^2)$$

$$N_s = 5.52 \quad (c = 2.9 \text{ kg/cm}^2)$$

$$N_s = 6.66 \quad (c = 2.4 \text{ kg/cm}^2)$$

$$N_s = 10.00 \quad (c = 1.6 \text{ kg/cm}^2)$$

つまり、図より安定係数 N_s が大きくなる（粘着力 c が小さくなる）と、限界水平地震加速度係数は小さくなり斜面は不安定に向かうと言える。

次に図-4は斜面角 β の影響を示したもので、縦軸は K_c である横軸に β を取ってある。斜面角 β が大きくなるに従って K_c は小さくなって行く。 K_c が0より小さな値を示す所では、斜面が自然崩壊することを表わしている。図中 β が 10° より小さな所で K_c の値が大きいのは図-3の場合と同様で、 $L/H \leq 10.0$ に制約した為に起こったもので斜面角 β が 10° より小さくなると崩壊は図-

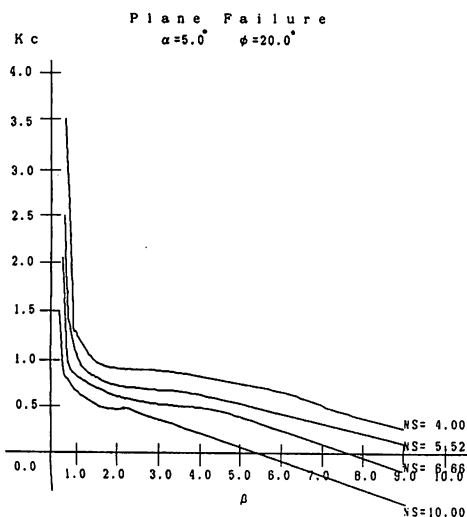
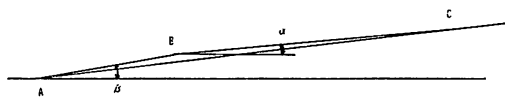
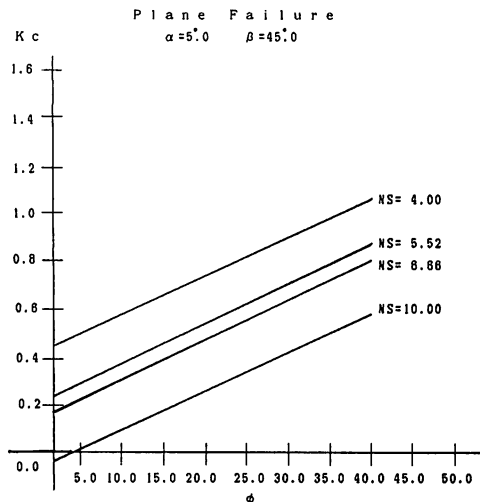
図-4 斜面角 (β) の影響

図-5

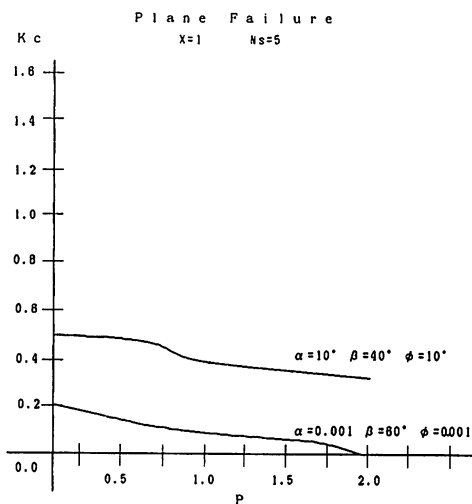
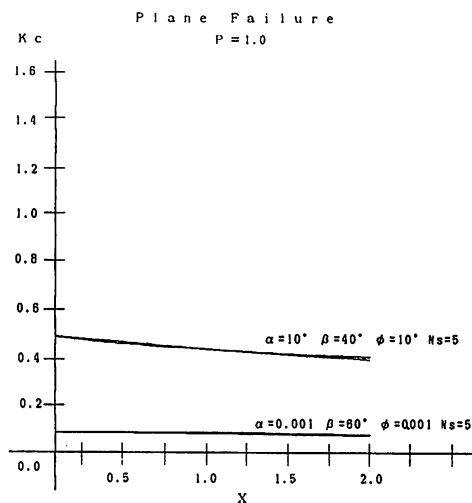
5 のように起こることになり、上部斜面角 $\alpha = 5.0^\circ$ に β が近づくにつれ、無限斜面の崩壊となり、すべり面を平面とする解析では起こり得ない崩壊となる。よって α を 10° 、 20° という条件下で計算すると β が各々 10° 、 20° 付近で急上昇するグラフが得られる。

次に図-6 では土の内部摩擦角 ϕ の影響を示し

図-6 内部摩擦角 (ϕ) の影響

ている。縦軸は K_c を取り横軸は土の内部摩擦角 ϕ を取っている。 ϕ が大きくなるにつれ K_c の値は大きくなり斜面は安定となり妥当な傾向を示す。以下の数値計算では載荷重 p とその低減係数 x はともに 0 とする条件で行っている。

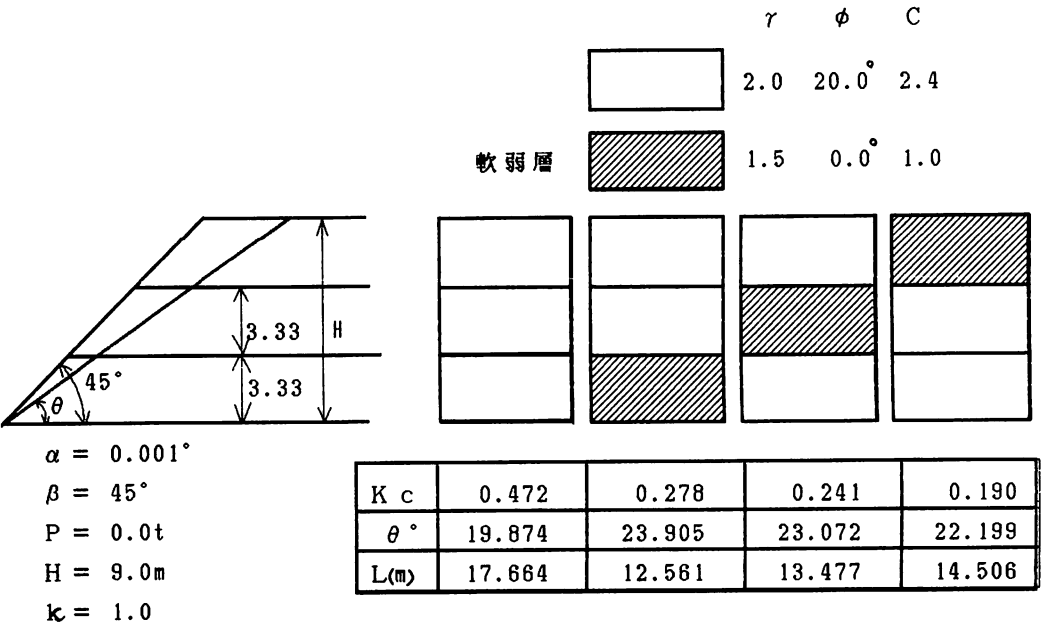
図-7 と図-8 は載荷重 p とその x の変化について示している。図よりいずれも p および x が大きくなるに従って K_c は小さくなり、斜面は不安定な方向へ進む傾向を示す。

図-7 載荷重 (p) の影響図-8 低減係数 (x) の影響

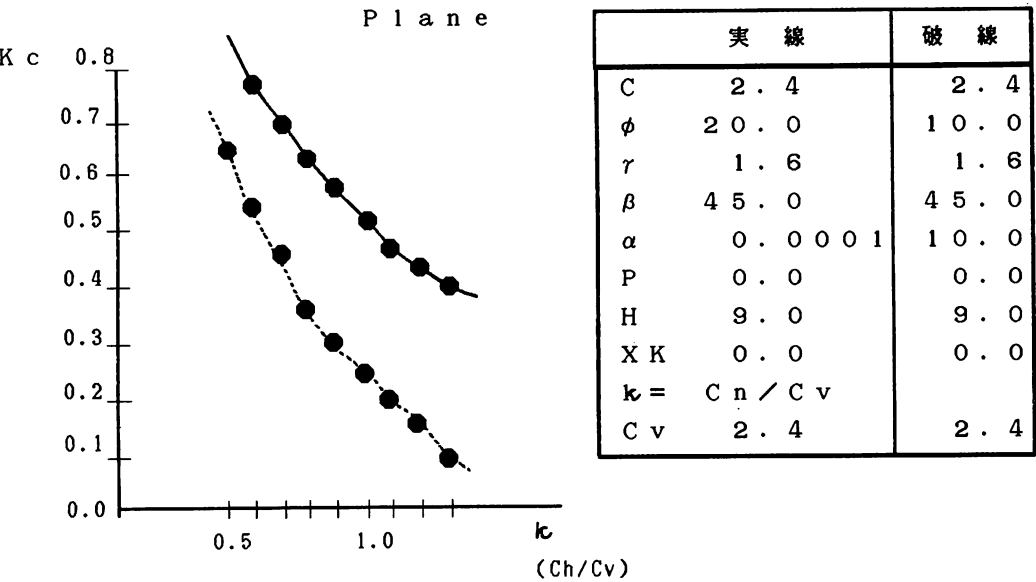
次に図-9 に軟弱層を含む不均質・異方性斜面の結果を示す。これは、軟弱層 ($\gamma = 1.5 \text{ t/m}^3$, $\phi = 0^\circ$, $c = 1.0 \text{ kg/cm}^2$) が下層・中層・上層に

ある各々の場合と等質な斜面の場合の解析結果の比較を示したものである。結果より、軟弱層が上部に移るに従って K_c の値が小さくなり斜面は不安定に向かうことを示す。 K_c は土塊のすべり仕事率とすべり面の粘着抵抗である消散（逸散）エネルギーとの関係から求めているが、仕事率では式の変形により断面一次モーメントを用いているので、面積と土の性質が大きな影響を与えること

になる。3層に分割してあるのですべり土塊の面積は上層が最大であり、中層・下層の順となり、不均質の場合前述(9), (10)式の $\dot{W}_1$, $\dot{W}_3$ に影響が出てくる。これらは、層ごとに求めた値を合計して求める訳であるが、下層に軟弱層のある場合、すべり土塊に占める軟弱層の割合は小さく、 K_c にそれ程影響を与えない。これに対して上層に軟弱層がある場合、面積が大きいので全体に占める



図－9 不均質・異方性斜面の場合



図－10 異方性係数（ κ ）の影響

割合も大きくなり、 K_c に大きな影響を与えることになる。

以上より、すべり土塊の全面積において、軟弱土塊の占める割合が大きくなる程 K_c の値は小さくなり斜面は不安定に向かうことがわかる。この場合、層の分割高を等しく取ってあるので軟弱層の位置による消散エネルギーの変化は考慮しなくて済むこととなる。これに対し、層分割において面積が等しくなるよう分割高を修正した場合、 K_c を支配するのは、すべり面の失う消散エネルギーに関する(13)式の W'_s と考えられる。

図-10は、土が異方性となる場合で c_v を固定し c_h の値を変化させた異方性係数 K の影響を求めている。図より $\kappa (= c_h / c_v)$ が大きく異方性が進むに従って K_c の値は減少し斜面は不安定に向かうことを示している。尚、 $\kappa = 1.0$ の時は等方な斜面の場合となる。

4. あ と が き

軟弱層を含む斜面の地震時の安定解析をすべり土塊とすべり面の消散エネルギー量とが等しいとして限界水平地震加速度係数を求めたものであった。計算結果及び図より、すべり面が平面崩壊機構となる場合は極限解析の上界法は繁雑な土の構成方程式を仮定することなくまた精緻な解析手法に頼らず斜面全体の形状を見失わない巨視的に解析可能となる有効な方法と言えよう。

おわりに、数値計算で御協力頂いた室蘭工業大学土木工学科構造力学講座の蹴場一男君、今野敏明君（S.58年度卒）および図の作製に協力頂いた苫小牧工業高等専門学校土木工学科第17期の荒井琢也君、相良隆記君並びに中村幸雄君に記して謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) Chen, W. F., "Limit Analysis of Stability of slopes", Journal of the Soil Mechanism and Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM1, January, 1971, pp.19-26
- 2) 澤田・能町・Chen, "Limit Analysis 法による地震時の慣性力を考慮した斜面の安定解析について", 土木学会第37回年次学術講演概要集, III-135
- 3) 土質工学ハンドブック, 技報堂, 1981
- 4) 澤田・Chen, "Seismic Stability of slopes in Nonhomogeneous, Anisotropic slopes", Stru-

ctural Engineering Technical Report, CE-STR 82-25, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, pp.1-108, 1982

- 5) 河上房義, 新編土質力学, 森北出版
- 6) 今野・山下, 非線形計画法, 日科技連
- 7) R. H. ギャラガー, 最適構造設計-基礎と設計-
- 8) 山田・大久保, 最適構造設計-概念・方法・応用-
- 9) 数値解析とFORTRAN-第3版-, 丸善
- 10) 澤田・能町, "地震時斜面上に置かれた基礎の安定における実験的研究", 土木学会北海道支部論文報告集, 第43号, 1987, pp.85-88
- 11) 澤田・能町・木田, "地震時におけるマウンド基礎の支持力について", 土木学会第43回年次学術講演概要集, III-109
- 12) 澤田・能町, "地震などの慣性力を受ける斜面構造における載荷重分担について", 土木学会北海道支部論文報告集, 第45号, 1989, pp.95-98

(平成元年11月30日受理)